

مدلسازی خسارت آفت سن گندم (*Eurygaster integriceps*. Put) بر رشد و عملکرد گندم پائیزه (*Triticum aestivum*) تحت شرایط تغییر اقلیم

Modeling of Sunn Pest Damage (*Eurygaster integriceps* Put.) on Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Growth and Yield Under Climate Change Condition

فرزاد مندنی^{۱*}، مهدی نصیری محلاتی^۲ و علیرضا کوچکی^۲

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۰۸

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۱۶

چکیده

در شرایط تغییر اقلیم برهمکنش میان گیاهان زراعی و آفات دچار تغییر خواهد شد. بنابراین پیش‌بینی خسارت آفات در این شرایط نقش مهمی در تعیین میزان تولیدات کشاورزی ایفا می‌کند. مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی ابزار مناسبی برای مطالعه اثرات تغییر اقلیم هستند. علی‌رغم تنوع فراوان مدل‌های رشد، در بیشتر آن‌ها ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روابط بین آفات و محصولات زراعی، لحاظ نشده است. بنابراین به منظور دستیابی به این اهداف یک مدل بوم‌شناختی فیزیولوژیک رشد و نمو ساخته شد. ساختار اصلی این مدل برگرفته از مدل لانتول یک بود. در این شبیه‌سازی ابتدا مراحل فنولوژی به مدل لانتول اضافه شد، سپس فرمان بهاره شدن برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم پاییزه وارد مدل گردید و برای شبیه‌سازی تولید در شرایط پتانسیل، تکمیل و واسنجی شد. در نهایت مدل با وارد کردن خسارت سن گندم بر رشد و عملکرد گندم برای شرایط اقلیم رایج و آینده اصلاح گردید. پارامترهای لازم برای ساخت و واسنجی مدل از نتایج تحقیقات پیشین استخراج شد. این مدل در محیط FST برنامه‌نویسی شد و سپس با داده‌های مشاهده شده مراحل فنولوژی، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم و همچنین درصد کاهش عملکرد گندم به علت خسارت سن گندم ارزیابی شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر بود با دقتی بالایی تغییرات مشاهده شده در صفات مورد بررسی را پیش‌بینی کند. در شرایط تغییر اقلیم به علت تسریع مراحل نمو، طول دوره رشد گندم از ۲۴۰ به ۲۱۷ روز کاهش یافت. در شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی افزایش متوسط درجه حرارت منجر به کاهش میانگین عملکرد دانه گندم در تراکم‌های مختلف سن تا حدود ۴۷ درصد و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن منجر به افزایش آن تا حدود ۳۶ درصد شد. همچنین برهمکنش افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و درجه حرارت نیز باعث کاهش میانگین عملکرد دانه تا حدود ۱۸ درصد نسبت به شرایط اقلیم فعلی شد. افزایش درجه حرارت و برهمکنش افزایش درجه حرارت و غلظت دی‌اکسیدکربن بر خلاف افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن منجر به شروع زودتر ریزش سن گندم به مزارع و افزایش طول دوره همپوشانی این حشره با طول دوره رشد گندم گردید. بنابراین به نظر می‌رسد که در شرایط تغییر اقلیم آینده در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی، میانگین میزان خسارت سن گندم در تراکم‌های مختلف بر عملکرد دانه گندم حدود ۷ درصد افزایش یابد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، مدلسازی خسارت آفات، ارزیابی مدل، کاهش عملکرد

۱. استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲. استادیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

Email: f.mondani@razi.ac.ir

* نویسنده مسئول:

مقدمه

طی هشت صد هزار سال قبل از انقلاب صنعتی غلظت گاز دی‌اکسیدکربن در اتمسفر کره زمین بین ۱۸۰ تا ۲۸۰ پی‌پی‌ام متغیر بوده است (Da Matta^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). اما از زمان شروع انقلاب صنعتی تا سال ۲۰۰۹، غلظت این گاز از حدود ۲۸۰ به ۳۸۴ پی‌پی‌ام افزایش یافته است که این میزان حدود ۳۰ درصد بیشتر از دهه‌های پیش از انقلاب صنعتی است و به دنبال این افزایش، میانگین درجه‌ی حرارت کره زمین نیز حدود ۰/۸ درجه سانتی‌گراد بالاتر رفته است (Da Matta و همکاران، ۲۰۱۰). از طرفی پیش‌بینی‌های مدل‌های گردش عمومی^۲ نیز نشان می‌دهند که تا انتهای قرن بیست و یکم غلظت این گاز به حدود ۷۰۰ پی‌پی‌ام یا بیشتر و میانگین درجه حرارت کره زمین نیز بین ۱/۴ تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (آی‌پی‌سی‌سی^۳، ۲۰۰۷). به این دگرگونی‌ها اصطلاحاً پدیده تغییر اقلیم گفته می‌شود که علاوه بر افزایش میانگین درجه حرارت سالانه کره زمین، تغییر در الگوی جهانی و محلی بارندگی و میزان تشعشع ورودی خورشید به سطح خاک را نیز در پی خواهد داشت.

در حال حاضر غلات بیش از هفتاد درصد از سطح زیر کشت گیاهان زراعی را به خود اختصاص داده و در حدود پنجاه درصد از پروتئین مورد نیاز انسان را نیز تأمین می‌کنند. در بین محصولات زراعی، گندم سهم عمده‌ای در برنامه‌ی غذایی انسان دارد، به گونه‌ای که مصرف سرانه‌ی آن در ایران حدود ۱۹۴ کیلوگرم در سال می‌باشد که این رقم بیش از دو برابر میانگین مصرف سرانه‌ی دنیا است (خانجانی، ۱۳۸۳). از طرفی همه ساله میزان قابل توجهی از محصول گندم به علت عوامل محدودکننده و کاهنده‌ی تولید از بین می‌رود. از جمله عوامل کاهنده‌ی عملکرد گندم، آفت سن گندم می‌باشد که در سراسر کشورهای خاور دور و نزدیک، جنوب و جنوب غرب اروپا و شمال آفریقا گسترش دارد و از طریق مصرف برگ، ساقه، شیره آوند آبکش و دانه گیاه منجر به ایجاد خسارت می‌شود (کنزازی^۴ و همکاران، ۲۰۰۵). در سطح جهان حدود ۸ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی به این آفت آلوده هستند (فائو^۵، ۲۰۰۹). این حشره دارای انتشار وسیعی در مناطق مختلف کشور می‌باشد به طوری که تقریباً تمام مناطق مستعد کشت گندم، به جز سواحل دریای خزر، به این آفت آلوده

هستند (خانجانی، ۱۳۸۳). بنابراین سن گندم و مسایل مربوط به آن در شرایط فعلی یکی از مهمترین مشکلات بخش کشاورزی کشور است (کنزازی و همکاران، ۲۰۰۵).

بدون شک حشرات نیز همانند سایر اجزای بوم نظام‌های زراعی، تحت تأثیر اثرات تغییر اقلیم قرار خواهند گرفت (فاهر^۶، ۲۰۰۳). تغییر شرایط محیطی هم بر جمعیت و فعالیت حشرات زیان‌بار و هم بر حشرات مفید تأثیرگذار خواهد بود و این اثرات به صورت مستقیم یا غیر مستقیم از طریق تغییراتی که در ترکیبات شیمیایی و فیزیولوژی گیاه میزبان یا از طریق اثراتی که بر شکارگرها، رقابت‌کننده‌ها و پاتوژن‌های حشرات دارد، نقش خود را ایفاء خواهد نمود (پترسون^۷، ۱۹۹۵). توزیع جغرافیایی حشرات نیز در بوم نظام‌های کشاورزی می‌تواند تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گیرد (مک دونالد^۸ و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین این امکان وجود دارد که مزایای مستقیمی که به علت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در تولیدات کشاورزی ایجاد می‌شود (پاری^۹ و همکاران، ۲۰۰۴)، توسط خسارت ناشی از آفات، خنثی گردد (مک‌کرتی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۱). از این رو، پیش‌بینی خسارت آفات در شرایط تغییر اقلیم، نقش کلیدی در تعیین میزان تولید سیستم‌های زراعی، باغبانی و جنگل‌داری ایفا می‌کند (بیامونت^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۵).

از جمله روش‌های مناسب و کم هزینه برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی، استفاده از رهیافت‌های مدل‌سازی است که طی چهار دهه گذشته مورد توجه فراوان محققان قرار گرفته است (توبیلو^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۷). به طوری که امروزه این مدل‌ها در سطح وسیعی جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصولات زراعی به کار برده می‌شوند (اسینگ^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۴). به دلیل کمبود دانش ما از چگونگی مکانیزم دقیق خسارت علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها بر فرایندهای رشد و نمو گیاه و وجود حشرات، بیماری‌ها و علف‌های هرز متعدد و در نهایت برهمکنشی که میان آفات، شرایط محیطی و عملیات‌های مدیریتی وجود دارد، ساخت و توسعه مدل‌های رشد برای ارزیابی اثرات آنها بر رشد و عملکرد محصولات کشاورزی از پیشرفت کمتری برخوردار بوده است. علاوه بر این چگونگی

6. Fuhrer

7. Patterson

8. McDonald

9. Parry

10. McCarthy

11. Beaumont

12. Tubiello

13. Asseng

1. Da Matta

2. General Circulation Model (GCM)

3. IPCC

4. Kazzazi

5. FAO

شبیه‌سازی رشد و نمو گندم پاییزه به مدل اضافه گردید و مدل اصلاح شده برای شبیه‌سازی تولید ماده خشک و مراحل نموی در شرایط پتانسیل اقلیمی، تکمیل و واسنجی گردید. سپس با وارد کردن مکانیزم‌های خسارت آفت سن گندم تکمیل گردید و پس از حصول اطمینان کافی از نحوه کارکرد و دقت مدل، به منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم در شرایط سناریوهای تغییر اقلیمی ناشی از افزایش غلظت دی‌اکسید کربن و درجه حرارت، اجرا شد. این مدل در محیط FST^۴ برنامه‌نویسی شد (فان کراالینگن^۵، 1995)، سپس با داده‌های حاصل از یک آزمایش مزرعه‌ای ارزیابی گردید. ورودی‌های مدل شامل اطلاعات هواشناسی (درجه حرارت کمینه و بیشینه روزانه بر حسب درجه سانتی‌گراد و میزان تشعشع روزانه بر حسب مگاژول بر متر مربع) بود که از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرستان مشهد (عرض جغرافیایی، ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی، ۵۶ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا) اخذ گردید.

مشخصات سیستم و مقادیر اولیه متغیرها

در این مدل، شبیه‌سازی‌ها در فواصل یک روزه انجام شد. تاریخ کاشت گندم، ۲۰ مهر ماه سال ۱۳۹۱ بود و آغاز شبیه‌سازی‌ها نیز از زمان کاشت، در نظر گرفته شد و تا مرحله رسیدگی کامل ادامه یافت. درجه حرارت پایه برای گندم، ۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد (طهماسبی و همکاران، ۱۳۹۰؛ جعفر نژاد و رحیمیان مشهدی، ۱۳۸۱). مقادیر اولیه برای شبیه‌سازی بیوماس کل، برگ، ساقه، ریشه و اندام ذخیره‌ای به ترتیب ۱۰، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۸ و صفر گرم در متر مربع، در نظر گرفته شد (ویلوکویت^۶ و همکاران، 2000).

شبیه‌سازی مراحل نموی

مراحل نموی از طریق انتگرال‌گیری از سرعت نمو در طی زمان شبیه‌سازی شد. سرعت نمو نیز از طریق تابع میان‌یابی در درجه حرارت‌های مختلف برای قبل و بعد از مرحله گلدهی به‌طور جداگانه محاسبه شد (اسپیترز^۷ و همکاران، 1989). درجه حرارت جمع‌ی نیز با در نظر گرفتن درجه حرارت پایه (T_B) و درجه حرارت م^V (DTEFF) بین

لحاظ کردن اثرات تغییر اقلیم بر رشد و نمو گیاه و محدودیت دسترسی به منابع موجود در این زمینه، بر پیچیدگی ساخت این نوع مدل‌ها می‌افزاید.

بدون شک تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش غلظت دی‌اکسید کربن و در پی آن افزایش متوسط درجه حرارت، تغییر در الگو و توزیع بارندگی و تغییر در میزان تشعشع ورودی به سطح خاک، باعث ایجاد تغییراتی در تنوع گونه‌ای، رقابت‌پذیری، توزیع جغرافیایی و قدرت تهاجم آفات در بوم نظام‌های زراعی خواهد شد (مک دونالد و همکاران، 2009). لذا جهت مدیریت آگاهانه سیستم‌های زراعی در شرایط تغییر اقلیم آینده، لازم است مکانیزم دقیق خسارت آفات به خوبی پیش‌بینی شود. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، این مطالعه با اهداف پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم (تا سال ۲۱۰۰ میلادی) بر عملکرد پتانسیل منطقه‌ای گندم پاییزه، پیش‌بینی میزان خسارت و زمان ریزش سن به مزارع گندم در شرایط تغییر اقلیم و همچنین پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در شرایط خسارت آفت سن گندم، تحت شرایط آب و هوایی مشهد اجرا شد.

مواد و روش‌ها

ساختار کلی مدل

به‌منظور شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گندم پاییزه و همچنین ویژگی‌های رفتاری آفت سن گندم و میزان خسارت این آفت بر رشد و نمو گندم یک مدل بوم‌شناختی فیزیولوژیک رشد و نمو محصولات زراعی ساخته شد. ساختار اصلی این مدل برگرفته از مدل لیتول^۱ می‌باشد که رشد گندم بهاره را برای شرایط تولید پتانسیل، متناسب با اطلاعات هواشناسی (میزان تشعشع روزانه، درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه) و براساس کارایی مصرف نور شبیه‌سازی می‌کند (دویت^۲، 1997). مدل لیتول تجمع ماده‌ی خشک را براساس درجه حرارت جمع‌ی و در شرایطی که هیچ‌گونه عامل محدود کننده (نظیر کمبود آب و عناصر غذایی) و کاهنده‌ی رشد (نظیر علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها) وجود نداشته باشد، شبیه‌سازی می‌کند.

در این مطالعه، ابتدا مراحل نموی گندم به ساختار اصلی مدل لیتول یک اضافه شد، سپس فرمان بهاره شدن^۳ برای

4. Fortran Simulation Translator
5. Van Kraalingen
6. Willocquet
7. Spitters

1. LINTUL: Light-Interception and Utilization Simulator
2. De Wit
3. Vernalization

مدلسازی خسارت آفت سن گندم (*Eurygaster integriceps*. Put) ...

مرحله سبز شدن تا گلدهی و گلدهی تا بلوغ از طریق انتگرال گیری از سرعت افزایش درجه حرارت تجمعی (RTSUM، بر حسب درجه سانتی‌گراد) در طی زمان از طریق معادلات زیر شبیه سازی شد:

(معادله ۱)

$$\left(\frac{dT_{SUM}}{dt}\right) = DTEFF \times EMERG$$

(معادله ۲)

$$DTEFF = \text{MAX}(0, T_A - T_B)$$

(معادله ۳)

$$T_A = \frac{(T_{MAX} + T_{MIN})}{2}$$

که در آنها EMERG، زمان سبز شدن بر حسب روز که ۱۰ روز پس از کاشت در نظر گرفته شد و T_A ، T_{MAX} و T_{MIN} ، به ترتیب متوسط درجه حرارت، درجه حرارت حداکثر و درجه حرارت حداقل روزانه می‌باشد.

شبیه‌سازی خسارت سن گندم

آفت سن از طریق جذب شیره آوند آبکش منجر به کاهش رشد و عملکرد گندم می‌شود (مهرآبادی^۱ و همکاران، ۲۰۰۹ و کریتچلی^۲، ۱۹۹۸). بنابراین خسارت این حشره (در این‌جا منظور خسارت سن‌های مادری) را می‌توان از طریق تأثیر یک عامل کاهش (RFs) بر سرعت رشد تولید بیوماس گندم در مدل محاسبه کرد:

$$RF_S = \text{MIN}(1, e^{-RS}) \quad (\text{معادله ۴})$$

$$RS = WS \times NS \times RFR \times TS \times WC \quad (\text{معادله ۵})$$

$$TS = \begin{cases} 0, & \text{if } DVS < 0.3 \\ 1, & \text{if } 0.3 \leq DVS \leq 1.9 \end{cases} \quad (\text{معادله ۶})$$

$$WC = \begin{cases} 0, & \text{if } T_A < 13.5 \\ 1, & \text{if } T_A \geq 13.5 \end{cases} \quad (\text{معادله ۷})$$

که در این معادلات RS، سرعت جذب روزانه ترکیبات فتوسنتزی توسط آفت سن (میلی‌گرم در مترمربع در روز)، WS، وزن خشک یک عدد سن در زمان ریزش به مزارع که معادل ۰/۰۶ میلی‌گرم، از طریق مشاهدات مستقیم کانون‌های زمستان گذران، کمی قبل از ریزش سن به مزارع اندازه‌گیری شد. NS، تراکم سن گندم در یک مترمربع، RFR، سرعت نسبی تغذیه یک عدد سن گندم از یک متر مربع از مزرعه، که ۰/۲۱ گرم در متر مربع در روز بود (نوری و همکاران، ۱۳۸۱)، TS، زمان ریزش سن به مزارع گندم که به‌شدت به مرحله

نموی گیاه و شرایط آب‌وهوایی منطقه (WC) به‌ویژه متوسط درجه حرارت روزانه بستگی دارد. در واقع نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهند که برای ریزش سن از کانون‌های زمستان گذران به مزارع گندم، تنها کافی است که متوسط درجه حرارت روزانه محیط طی یک دوره ۳ روزه بیش از ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد باشد (خانجانی، ۱۳۸۳).

واسنجی پارامترهای مدل

در این بررسی از میان پارامترهای بکار رفته در مدل، کارایی مصرف نور، درجه حرارت پایه، سطح ویژه برگ و ضریب خاموشی نور با هدف به حداقل رساندن اختلاف بین داده‌های شبیه سازی شده با مشاهدات برای واسنجی انتخاب شد. به منظور واسنجی پارامترهای مذکور، اطلاعات مورد نیاز از آزمایش‌هایی که قبلاً در زمینه ارزیابی میزان خسارت آفت سن در ایران اجرا شده بود، استفاده شد (مهرآبادی و همکاران، ۲۰۰۹؛ بهرامی و همکاران، ۱۳۸۱؛ مظفری و عزیزیان، ۱۳۹۰؛ نوری و همکاران، ۱۳۸۱).

ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی این مدل، آزمایشی در سال زراعی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، واقع در ۱۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شهر مشهد انجام شد. متوسط بارندگی سالیانه ۲۸۶ میلی‌متر و حداکثر و حداقل دمای مطلق سالانه در این منطقه به ترتیب ۴۲ و ۲۷/۸- درجه سانتی‌گراد بود. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با ۳ تکرار و ۵ تیمار اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل تراکم‌های صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ سن مادر در متر مربع بود. آماده سازی مزرعه شامل شخم نیمه عمیق، سپس دیسک و کود پاشی، قبل از کاشت انجام شد. بر اساس نتایج آزمایشگاه خاک‌شناسی (جدول ۱) میزان ۴۰ تن در هکتار کود دامی کاملاً پوسیده، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره (یک سوم آن در زمان کاشت و مابقی به‌صورت سرک در زمان ساقه رفتن گندم)، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم، قبل از کاشت به خاک اضافه شد. در این بررسی از گندم رقم فلات استفاده شد. بذر گندم به‌صورت دستی و با فواصل ۲۰ سانتی‌متر روی ردیف‌ها و در عمق ۳ تا ۵ سانتی‌متری کاشت شد. تراکم نهایی گندم ۴۰۰ بوته در متر مربع بود.

1. Mehrabadi
2. Critchley

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر
Table 1: Physico-chemical properties of soil (0-30 cm depth) at the experimental site

پارامترها Factors	میزان (%) Amount (%)	پارامترها Factors	میزان (%) Amount (%)
ذرات رس Clay	60.7	نیتروژن (قسمت در میلیون) N (ppm)	432.1
ذرات سیلت Silt	25.4	فسفر (قسمت در میلیون) P (ppm)	8.2
ذرات شن Sand	13.9	پتاسیم (قسمت در میلیون) K (ppm)	256.0
مواد آلی Organic matters	0.43	اسیدیته PH	7.6

پاییزه و همچنین کاهش عملکرد به علت خسارت آفت سن در شرایط سناریوهای تغییر اقلیم اجرا شد.

شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم

در جدول ۲ سناریوهای تغییر اقلیم به کار رفته در این بررسی نشان داده شده است. در این مطالعه ۹ سناریو جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گندم و کاهش عملکرد ناشی از خسارت سن در نظر گرفته شد (جدول ۲). در این شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم ناشی از افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، افزایش درجه حرارت و برهم‌کنش آنها بر رشد و عملکرد گندم از طریق تأثیر این عوامل اقلیمی بر کارایی مصرف نور و مراحل نمو گیاه، لحاظ گردید (ریچتر و سیمینوف^۱، ۲۰۰۵؛ کیمبل^۲ و همکاران، ۲۰۰۲؛ جامیسون^۳ و همکاران، ۲۰۰۰). همچنین اثرات افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر سن گندم به‌طور غیرمستقیم و از طریق افزایش سرعت نسبی تغذیه حشره در واکنش به افزایش سرعت رشد روزانه گندم محاسبه شد. علاوه بر این، اثرات افزایش درجه حرارت نیز از طریق تأثیر بر زمان ریزش سن به مزارع گندم شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث

اثرات تغییر اقلیم بر سن گندم

سن گندم در شرایط اقلیم فعلی (سناریوی A) در حدود ۱۶۸ روز پس از کاشت که مصادف با ابتدای مرحله طولیل شدن ساقه گندم بود، از کانون‌های کوهستانی زمستان گذران خود واقع در کوه‌های اطراف دشت مشهد به مزارع حمله ور شده و

واحدهای آزمایشی به ابعاد ۳×۳ مترمربع بود. برای جلوگیری از پرواز حشره سن از قفس‌هایی به ابعاد ۱/۵ × ۱ × ۱ متر استفاده شد. سن گندم هم زمان با شروع ریزش این آفت از کانون‌های زمستان گذران به سمت مزارع گندم دشت مشهد که مصادف با ابتدای مرحله ساقه رفتن گندم بود، جمع‌آوری شد و به کرت‌های آزمایشی اضافه شد. آبیاری بر حسب نیاز و به روش غرقابی صورت گرفت. در تمام طول فصل رشد، از هجوم سایر علف‌های هرز، آفات و بیماری‌های گیاهی به کرت‌های آزمایش جلوگیری شد و به این صورت شرایط کاملاً مطلوبی برای رشد و نمو گندم فراهم گردید. اندازه‌گیری‌ها نیز شامل ثبت مراحل نمو بر حسب روز پس از سبز شدن و نمونه‌برداری از عملکرد، وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم در انتهای دوره رشد (نیم متر مربع از هر کرت).

شاخص‌های ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم از برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده (O_i) و شبیه‌سازی شده (S_i) و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ و روش درصد جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%)، که اختلاف نسبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد، استفاده شد (نصیری محلاتی و کوچکی، ۱۳۸۸):

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{100}{\bar{O}} \quad (\text{معادله ۸})$$

در این ارزیابی اگر نتایج درصد جذر میانگین مربعات خطا کمتر از ۱۰ باشد، نشان از درجه عالی شبیه‌سازی، بین ۱۰ تا ۲۰، درجه خوب، بین ۲۰ تا ۳۰، درجه متوسط و بالاتر از ۳۰، نشان از دقت غیر قابل قبول دارد. بعد از تعیین اعتبار، مدل به‌منظور شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گندم

1. Richter and Semenov
2. Kimball
3. Jamieson

شدن دانه گندم، مزارع را به سمت کانون‌های زمستان گذران ترک کرد (جدول ۳).

پس از یک دوره تغذیه ۶۴ روزه در ۲۳۲ روز پس از کاشت که مصادف با انتهای مرحله خمیری شدن دانه بود، به علت سخت

جدول ۲: سناریوهای تغییر اقلیم ناشی از افزایش غلظت دی‌اکسید کربن و متوسط درجه حرارت در طول دوره رشد گیاه

Table 2: Climate change scenarios due to increased CO₂ and temperature during growing season

سناریوهای تغییر اقلیم Climate Change Scenarios	افزایش غلظت دی‌اکسید کربن (قسمت در میلیون) Increased CO ₂ (ppm)	افزایش درجه حرارت (سانتی‌گراد) Increased Temperature (°C)
A		0
B	380	2
C		4
D		0
E	550	2
F		4
G		0
H	700	2
K		4

جدول ۳: زمان ریزش و طول دوره همپوشانی سن گندم با مراحل نموی گندم تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم
Table 5: Sunn pest invasion time and its overlap with wheat development stages under different climate change scenarios

سناریوهای تغییر اقلیم Climate Change Scenarios									پارامترها
K	H	G	F	E	D	C	B	A	
147	152	168	147	152	168	147	152	168	شروع ریزش Beginning of appear
209	218	232	209	218	232	209	218	232	پایان ریزش End of appear
62	63	64	62	63	64	62	63	64	همپوشانی سن با دوره رشد گندم (روز) Sunn pest overlap with wheat (day)
29	27	26	29	27	26	29	27	26	همپوشانی سن با دوره رشد گندم (درصد) Sunn pest overlap with wheat (%)

در شرایط اقلیم فعلی طول دوره حضور سن در مزارع گندم ۶۴ روز بود، در حالی که با افزایش ۲ و ۴ درجه سانتی‌گراد به متوسط درجه حرارت، طول دوره حضور به ترتیب به ۶۳ و ۶۲ روز کاهش یافت (جدول ۳). همچنین نتایج این بررسی نشان داد که در شرایط اقلیم فعلی درصد همپوشانی طول دوره حضور سن با طول دوره رویش گندم، ۲۶ درصد بود، در صورتی که با افزایش ۲ و ۴ درجه سانتی‌گراد به متوسط درجه حرارت، درصد همپوشانی به ترتیب به ۲۷ و ۲۹ درصد افزایش یافت (جدول ۳). بنابراین به نظر می‌رسد که در شرایط تغییر اقلیم آینده در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی، بالا رفتن متوسط درجه حرارت، منجر به شروع زودتر ریزش آفت سن از کانون‌های زمستان گذران به سمت مزارع و افزایش طول دوره همپوشانی آن با طول دوره رویش گندم خواهد شود و این

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که افزایش متوسط درجه حرارت منجر به هجوم زود هنگام سن گندم به مزارع شد، به طوری که با افزایش ۲ و ۴ درجه سانتی‌گراد به متوسط درجه حرارت در طول دوره رشد، شروع ریزش سن گندم از ۱۶۸ روز پس از کاشت به ترتیب به ۱۵۲ و ۱۴۷ روز پس از کاشت موکول شد و پایان دوره حضور نیز از ۲۳۲ روز پس از کاشت به ترتیب به ۲۱۸ و ۲۰۹ روز پس از کاشت موکول شد (جدول ۳). از نقطه نظر مراحل فنولوژیکی گندم افزایش متوسط درجه حرارت تغییری در زمان شروع و انتهای حضور سن در مزارع گندم پاییزه ایجاد نکرد. از آنجا که با افزایش متوسط درجه حرارت، مراحل فنولوژیکی گندم نیز به علت تسریع سرعت نمو، سریع‌تر طی شد، بنابراین این نتیجه دور از انتظار نبود.

درجه حرارت، نتایج مشابهی با افزایش درجه حرارت در طول دوره رشد در پی داشت.

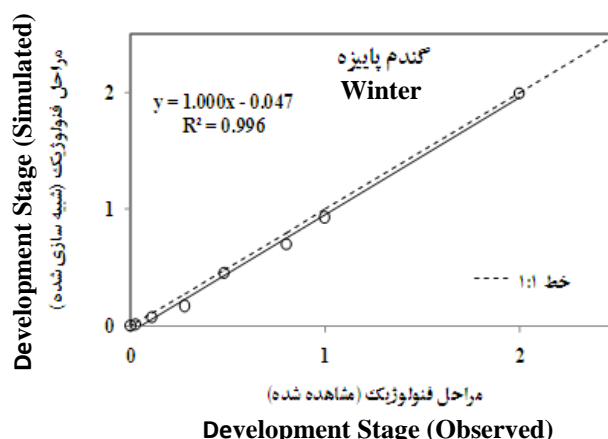
اثرات تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیکی گندم پاییزه

نتایج این بررسی نشان داد که در شرایط اقلیم فعلی، گندم با کسب ۱۱۷۰/۸ درجه روز رشد در شرایط شبیه‌سازی و مزرعه به‌ترتیب در ۱۹۸ و ۱۹۲ روز پس از کاشت به مرحله گلدهی رسید و سپس به‌علت افزایش سرعت نمو ناشی از بالا رفتن متوسط درجه حرارت روزانه، با کسب ۸۳۵/۱ درجه روز رشد در شرایط شبیه‌سازی و مزرعه به‌ترتیب در ۲۴۰ و ۲۳۹ روز پس از کاشت به مرحله رسیدگی کامل رسید. مجموع درجه حرارت تجمعی از زمان سبز شدن تا رسیدگی کامل، ۲۰۰۵/۹ درجه روز رشد بود. همچنین طول دوره پر شدن دانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به‌ترتیب، ۴۲ و ۴۷ روز بود. اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای طول دوره رویشی و پر شدن دانه به‌ترتیب، ۶ و ۵ روز بود.

نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مراحل فنولوژیکی گندم و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نشان از عدم اختلاف معنی‌داری داشت و مدل قادر بود تا بیش از ۹۹ درصد از تغییرات مشاهده شده را پیش‌بینی کند (شکل ۱). علاوه بر این، درصد جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%) که نشان‌دهنده دقت مدل در شبیه‌سازی مراحل نمو گندم و مقایسه آن با داده‌های مشاهده شده است، ۱۰/۳۸ درصد بود که نشان می‌دهد مدل قابلیت خوبی در شبیه‌سازی مراحل نمو داشت.

موضوع منجر به افزایش میزان خسارت این آفت خواهد گردد. نتایج بررسی‌های پیشین نشان می‌دهند که از جمله عوامل اقلیمی تأثیرگذار بر بهبود شرایط زمستان‌گذرانی سن گندم در کانون‌های زمستان‌گذران، درجه حرارت می‌باشد (موحدی فاضل و عبداللهی، ۱۳۸۱). در سال‌هایی که متوسط درجه حرارت طی دوره زمستان‌گذرانی پایین باشد، افزایش سرما نه تنها منجر به افزایش تلفات سن گندم در این کانون‌ها می‌شود، بلکه منجر به کاهش متوسط وزن خشک سن‌های بالغ در زمان ریزش می‌شود (ایرانی‌پور و همکاران، ۱۳۸۱).

وزن خشک حشره بالغ سن گندم در زمان ریزش یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده میزان خسارت آن به محصولات زراعی است، به‌طوری‌که با کاهش متوسط وزن خشک آن، به‌علت کاهش قدرت پرواز و تغذیه این حشره از اندام‌های مختلف محصولات زراعی، میزان خسارت نیز کاهش می‌یابد (موحدی‌فاضل و عبداللهی، ۱۳۸۱). مظفری و عزیزیان (۱۳۹۰) گزارش کردند که با افزایش متوسط درجه حرارت سالیانه در استان کردستان تعداد روزهای همراه با یخبندان کاهش چشمگیری یافته و این افزایش دما باعث شد که سن گندم به دور از هرگونه مرگ‌ومیری مراحل زمستان‌گذرانی خود را با موفقیت گذرانده و با تغذیه کامل از محصول، جمعیت خود را افزایش داده و به‌شدت طغیان کند. نتایج پیش‌بینی‌ها همچنین نشان داد که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از ۳۸۰ به ۷۰۰ پی‌پی‌ام بر زمان ریزش و طول دوره همپوشانی سن گندم با طول دوره رویشی گندم پاییزه تأثیری نداشت، در حالی‌که برهم‌کنش افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و متوسط



شکل ۱: مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده مراحل فنولوژیکی گندم

Fig. 1: Comparison of observed and simulated phenological development stages of wheat

داد که افزایش متوسط درجه حرارت در طول دوره رشد به میزان ۲ و ۴ درجه سانتی‌گراد، مرحله رویشی گندم را به‌ترتیب، ۱۳ و ۲۲ روز کاهش داد. افزایش ۲ و ۴ درجه

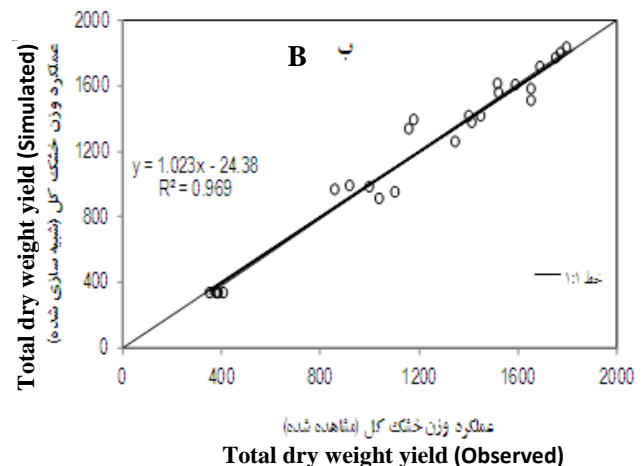
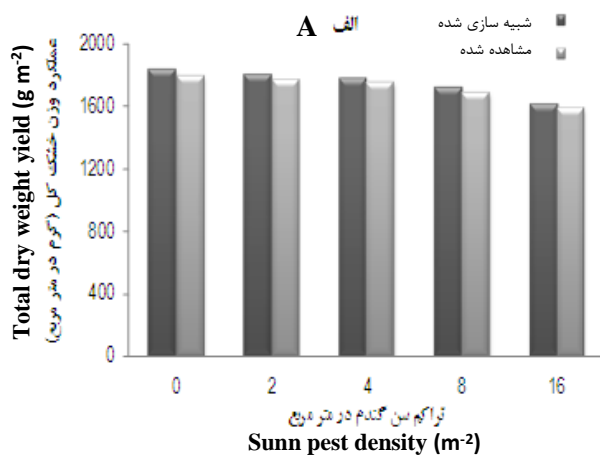
در شرایط تغییر اقلیم، افزایش متوسط درجه حرارت در طول دوره رشد از طریق تسریع سرعت مراحل فنولوژیکی گیاه منجر به کاهش طول دوره نمو شد. نتایج پیش‌بینی‌ها نشان

ریچتر و سیمینوف (2005) نیز دریافتند که افزایش درجه حرارت در شرایط تغییر اقلیم منجر به کاهش طول دوره نمودن زمستانه در انگلستان شد. نامبردگان اظهار داشتند که طول دوره رویشی در مقایسه با طول دوره پرشدن دانه بیشتر تحت تأثیر اثرات تغییر اقلیم قرار گرفت.

اثرات تغییر اقلیم بر وزن خشک کل

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که با افزایش تراکم سن در مترمربع حداکثر میزان وزن خشک کل گندم در تیمارهای ۲، ۴، ۸ و ۱۶ حشره در متر مربع نسبت به شرایط عاری از آفت به ترتیب، ۱/۶، ۳/۲، ۶/۵ و ۱۱/۹ درصد کاهش یافت (شکل ۲). در شرایط مزرعه نیز با افزایش تراکم سن در تیمارهای ۲، ۴، ۸ و ۱۶ حشره در متر مربع نسبت به شاهد وزن خشک کل به ترتیب، ۱/۷، ۴/۳، ۶/۸ و ۱۱/۷ درصد کاهش یافت (شکل ۲).

سانتی‌گراد به متوسط درجه حرارت در طول دوره رشد در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط فعلی به ترتیب منجر به کاهش ۶/۶ و ۱۱/۱ درصدی طول مرحله رویشی شد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش ۲ و ۴ درجه سانتی‌گراد به متوسط درجه حرارت به ترتیب با صفر و ۲/۴ درصد کاهش منجر به کاهش به ترتیب، صفر و ۱ روزه طول دوره پر شدن دانه شد. بنابراین کل طول دوره رشد گندم با افزایش ۲ و ۴ درجه سانتی‌گراد به ترتیب حدود ۱۳ و ۲۳ روز کاهش یافت. اثرات تغییر اقلیم ناشی از افزایش درجه حرارت بر طول مرحله رویشی گیاه در مقایسه با طول دوره پر شدن دانه بیشتر بود. این اثرات مشابه اثرات برهم‌کنش افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و درجه حرارت بود. با این وجود، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از ۳۸۰ تا ۷۰۰ پی‌پی‌ام هیچ گونه تأثیر مستقیمی بر طول دوره نمودن نداشت. کوچکی و همکاران (۱۳۸۰) نیز در بررسی دیگری گزارش کردند که در شرایط تغییر اقلیم، افزایش درجه حرارت باعث ۲۶ روز کاهش در طول دوره نمودن گندم در شرایط آب و هوایی مشهد شد.



شکل ۲: مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عملکرد وزن خشک کل گندم در تراکم‌های مختلف سن (الف). ب: مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد وزن خشک کل گندم (گرم در متر مربع) در تراکم‌های مختلف سن

Fig. 2: Observed and simulated total dry weight yield of wheat in different number of individual sunn pest densities (A). B: Comparison of observed and simulated total dry weight yield of wheat (g m⁻²) in different number of individual sunn pest densities

همان‌گونه که یافته‌های این تحقیق نشان داد در تیمارهای مورد بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با مشاهدات اختلاف بسیار ناچیزی داشت، به طوری که میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) وزن خشک کل برای تیمارهای صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ سن گندم در مترمربع به ترتیب، ۵/۴۴، ۸/۹۳، ۵/۰۶، ۱۰/۳۳ و ۵/۸۵ درصد میانگین مشاهدات بود. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز

همان‌گونه که یافته‌های این تحقیق نشان داد در تیمارهای مورد بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها در مقایسه با مشاهدات اختلاف بسیار ناچیزی داشت، به طوری که میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) وزن خشک کل برای تیمارهای صفر، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ سن گندم در متر مربع به ترتیب، ۶۶/۲۱، ۱۰۶/۸۳، ۵۹/۸۲، ۱۲۳/۴۱ و ۶۶/۸۹ گرم در مترمربع، در مقایسه با میانگین به ترتیب، ۱۲۱۶/۶۲

وزن خشک کل به علت خسارت سن در تراکم ۱۶ حشره در متر مربع نسبت به شرایط عاری از حشره در سناریوی C (۱۴/۷۵ درصد) در مقایسه با سناریوهای A (۱۲/۳۰ درصد)، B (۱۳/۳۰ درصد)، D (۱۱/۸۸ درصد)، E (۱۲/۷۱ درصد)، F (۱۴/۰۱ درصد)، G (۱۱/۶۶ درصد)، H (۱۲/۴۲ درصد) و K (۱۳/۶۰ درصد) بیشتر بود (جدول ۵).

همچنین میانگین میزان خسارت سن به عملکرد وزن خشک کل تحت شرایط سناریوهای تغییر اقلیم از ۵/۲ تا ۲۰/۲ درصد در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی تغییر کرد (جدول ۵). بنابراین افزایش درجه حرارت و برهم‌کنش افزایش درجه حرارت و غلظت دی‌اکسیدکربن، منجر به افزایش خسارت سن بر وزن خشک کل شد، با این وجود افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن خسارت این حشره را کاهش داد. ترنکا^۲ و همکاران (۲۰۰۷) نیز در بررسی دیگری دریافتند که در شرایط اقلیمی آینده افزایش متوسط درجه حرارت سالانه منجر به افزایش تعداد نسل کرم ساقه خوار اروپایی ذرت و همزمانی بیشتر آن با مراحل نموی گیاه شده و از این طریق میزان خسارت این آفت بر عملکرد ذرت افزایش خواهد یافت.

اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد دانه

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های مشاهده شده عملکرد دانه نشانگر از اختلاف بسیار ناچیزی از یکدیگر بود، به طوری که با افزایش تراکم سن، عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در تیمارهای ۲، ۴، ۸ و ۱۶ حشره در مترمربع نسبت به شرایط عاری از حشره به ترتیب، ۲/۲، ۴/۳، ۸/۵ و ۱۵/۱ درصد کاهش یافت، در حالی که عملکرد دانه مشاهده شده به ترتیب، ۱/۱، ۳/۹، ۶/۸ و ۱۴/۱ درصد کاهش یافت (شکل ۳).

نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۹۴ درصد از تغییرات وزن خشک کل مشاهده شده را پیش‌بینی کرده و توانایی بالایی برای پیش‌بینی وزن خشک کل گندم در شرایط خسارت سن گندم داشت (شکل ۲).

نتایج پیش‌بینی‌ها همچنین نشان داد که در هر یک از تراکم‌های سن، بیشترین و کمترین وزن خشک کل به ترتیب به سناریوهای G و C مربوط بود (جدول ۴). در هر تیمار، میانگین وزن خشک کل تحت شرایط سناریوهای تغییر اقلیم در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی از ۴۵/۵- تا ۳۵/۳ درصد تغییر کرد (جدول ۴). بنابراین افزایش متوسط درجه حرارت و برهم‌کنش افزایش متوسط درجه حرارت و غلظت دی‌اکسیدکربن دارای تأثیر منفی بر وزن خشک کل بود، در حالی که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اثر مثبتی داشت. به نظر می‌رسد افزایش متوسط درجه حرارت از طریق کاهش طول مراحل فنولوژیکی، منجر به کاهش طول دوره فتوسنتز گیاه شده و از این طریق باعث کاهش وزن خشک کل گردید. از طرفی افزایش درجه حرارت از طریق افزایش تنفس نوری و تنفس تاریکی گیاه، باعث کاهش میزان فتوسنتز خالص شده و به دنبال آن عملکرد نیز کاهش یافت.

برخلاف افزایش متوسط درجه حرارت، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن از طریق افزایش میزان فتوسنتز خالص و کارایی مصرف نور، منجر به افزایش وزن خشک کل شد. همچنین در شرایط افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تا ۷۰۰ پی‌پی‌ام نسبت به غلظت ۳۸۰ و ۵۰۰ پی‌پی‌ام، تأثیر افزایش درجه حرارت بر کاهش عملکرد دانه کاهش یافت که نشان‌دهنده نقش حاصلخیزی این گاز بر رشد و عملکرد گندم بود. هوگی^۱ و همکاران (2010) نیز نشان دادند که با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن به بیش از ۵۳۰ پی‌پی‌ام، عملکرد وزن خشک کل گندم تا حدود ۱۱ درصد افزایش یافت. /سینگ و همکاران (2004) نیز دریافتند که با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن به بیش از ۵۵۰ پی‌پی‌ام، وزن خشک کل گندم از حدود ۱۳ به ۱۸ تن در هکتار بهبود یافت، در حالی که برهم‌کنش افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و درجه حرارت منجر به کاهش آن شد.

نتایج پیش‌بینی‌ها همچنین نشان داد که در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم آینده همچون شرایط اقلیم فعلی، با افزایش تراکم سن، وزن خشک کل گندم کاهش یافت. کاهش

جدول ۴: اثرات تغییرات احتمالی اقلیم در آینده در مقایسه با شرایط اقلیمی فعلی بر وزن خشک کل گندم (گرم در مترمربع) در تراکم‌های مختلف سن گندم در مترمربع

Table 4: Impacts of future climate change compare to ambient climate on wheat total dry weight yield in different number of individual sunn pest densities (sunn n/m²)

تراکم سن در متر مربع sunn pest densities (sunn n/m ²)	سناریوهای تغییر اقلیم Climate Change Scenarios								
	A	B	C	D	E	F	G	H	K
0	1837.6	1377.7	1012.5	2225.2	1748.8	1321.8	2478.9	1968.8	1529.8
2	1806.7	1352.5	991.9	2189.1	1718.3	1296.3	2439.5	1935.4	1501.2
4	1776.5	1328.0	971.9	2153.9	1688.7	1271.6	2401.0	1902.8	1473.4
8	1718.6	1281.0	933.5	2086.2	1631.7	1224.0	2326.9	1840.1	1420.0
16	1611.6	1194.4	863.2	1960.9	1526.5	1136.6	2189.9	1724.2	1321.7
میانگین Average	1750.2	1306.7	954.6	2123.1	1662.8	1250.1	2367.2	1874.3	1449.2
درصد تغییرات نسبت به سناریوی A Changes to A scenario (%)		-25.4	-45.5	21.3	-5.0	-28.6	35.3	7.1	-17.2

جدول ۵: اثرات تغییرات احتمالی اقلیم در آینده در مقایسه با شرایط اقلیمی فعلی بر درصد کاهش وزن خشک کل گندم در تراکم‌های مختلف سن گندم در مترمربع

Table 5: Impacts of future climate change compare to ambient climate on loss of wheat total dry weight yield in different number of individual sunn pest densities (sunn n/m²)

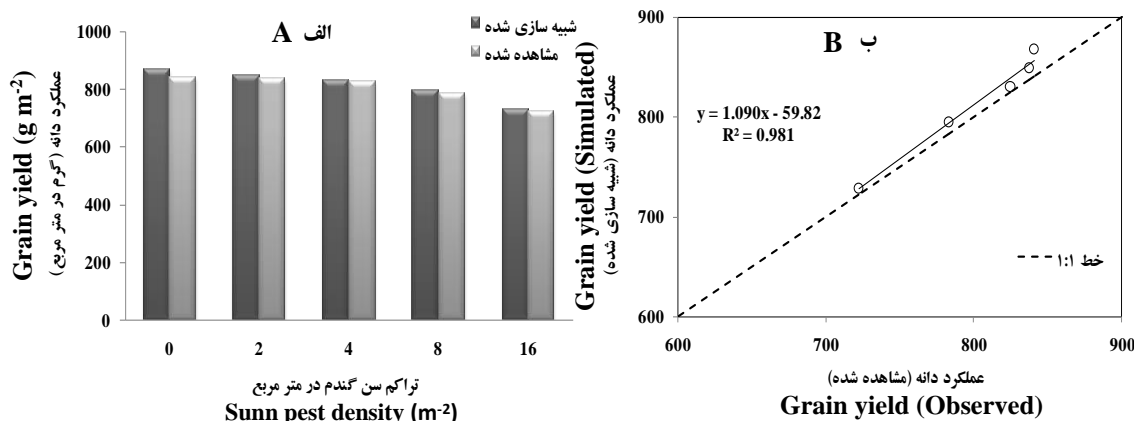
تراکم سن در متر مربع sunn pest densities (sunn n/m ²)	سناریوهای تغییر اقلیم Climate Change Scenarios								
	A	B	C	D	E	F	G	H	K
2	1.7	1.8	2.0	1.6	1.7	1.9	1.6	1.7	1.9
4	3.3	3.6	4.0	3.2	3.4	3.8	3.1	3.4	3.7
8	6.5	7.0	7.8	6.2	6.7	7.4	6.1	6.5	7.2
16	12.3	13.3	14.7	11.9	12.7	14.0	11.7	12.4	13.6
میانگین Average	5.9	6.4	7.2	5.7	6.1	6.8	5.6	6.0	6.6
درصد تغییرات نسبت به سناریوی A Changes to A scenario (%)		8.3	20.2	-3.4	3.3	14.1	-5.2	0.9	10.7

نتایج پیش‌بینی‌های اثرات تغییر اقلیم نیز نشان داد که در هر یک از تراکم‌های سن، بیشترین و کمترین عملکرد دانه به ترتیب در سناریوهای G و C مشاهده شد (جدول ۶). همچنین در هر تیمار میانگین عملکرد دانه تحت شرایط سناریوهای تغییر اقلیم از ۴۷/۴- تا ۳۶/۵ درصد در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی تغییر کرد (جدول ۶). بنابراین افزایش درجه حرارت و برهم‌کنش افزایش درجه حرارت و غلظت دی‌اکسیدکربن بر خلاف افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، بر عملکرد دانه تأثیر منفی داشت. نتایج همچنین نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط اقلیم فعلی، عملکرد دانه بیشتر از وزن خشک کل تحت تأثیر قرار گرفت. این در صورتی است که اثرات تغییر اقلیم بر طول مرحله رویش گیاه

میزان جذر میانگین مربعات خطای (RMSE) عملکرد دانه، ۱۴/۶۸ گرم در متر مربع، در مقایسه با میانگین ۸۰۱/۵۷ گرم در متر مربع مشاهده شده آن بود و دقت مدل (RMSE%) نیز ۱/۸۳ درصد میانگین مشاهده شده بود. همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد ارزیابی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا ۹۸ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کند (شکل ۳) و بر این اساس توانایی بسیار بالایی برای پیش‌بینی عملکرد دانه گندم پاییزه در شرایط خسارت سن داشت.

نشان دادند که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تاثیر منفی درجه حرارت را تا حدودی تعدیل کرد، با این وجود در شرایط اقلیمی سال هدف، عملکرد در مناطق مختلف تولید در محدوده‌ای بین ۱۴ تا ۲۱ درصد کاهش یافت.

بیشتر از طول مرحله زایشی بود که این مسأله نشان‌دهنده اهمیت فراوان کاهش طول دوره پر شدن دانه در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد. کوچکی و نصیری‌محللاتی (۱۳۸۷) در پیش‌بینی عملکرد گندم آبی برای سال ۲۰۵۰ میلادی نیز



شکل ۳: مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده عملکرد دانه گندم در تراکم‌های مختلف سن (الف). ب: مقایسه مقادیر

شبیه‌سازی شده و مشاهده شده عملکرد دانه گندم در تراکم‌های مختلف سن

Fig. 3: Observed and simulated grain yield of wheat in different number of individual sunn pest densities (A). B: Comparison of observed and simulated grain yield of wheat (g m⁻²) in different number of individual sunn pest densities

جدول ۶: اثرات تغییرات احتمالی اقلیم در آینده در مقایسه با شرایط اقلیمی فعلی بر عملکرد دانه گندم (گرم در مترمربع) در تراکم‌های مختلف سن گندم در مترمربع

Table 6: Impacts of future climate change compare to ambient climate on wheat grain yield in different number of individual sunn pest densities (sunn n/m²)

تراکم سن در متر مربع sunn pest densities (sunn n/m ²)	سناریوهای تغییر اقلیم Climate Change Scenarios								
	A	B	C	D	E	F	G	H	K
0	867.9	648.8	460.5	1058.0	833.9	611.7	1182.0	944.0	714.6
2	848.8	633.7	448.9	1035.2	815.2	596.9	1156.9	923.2	697.8
4	830.2	619.1	437.7	1013.1	797.0	582.6	1132.6	903.0	681.4
8	794.5	591.1	416.2	970.6	762.2	555.2	1085.7	864.1	650.1
16	728.6	539.6	377.1	892.1	697.9	504.9	998.9	792.5	592.5
میانگین Average	814.0	606.5	428.1	993.8	781.2	570.3	1111.2	885.4	667.3
درصد تغییرات نسبت به سناریوی A Changes to A scenario (%)		-25.5	-47.4	22.1	-4.0	-30.0	36.5	8.8	-18.0

جدول ۷: اثرات تغییرات احتمالی اقلیم در آینده در مقایسه با شرایط اقلیمی فعلی بر عملکرد دانه گندم (گرم در مترمربع) در تراکم‌های مختلف سن گندم در مترمربع

Table 7: Impacts of future climate change compare to ambient climate on wheat grain yield in different number of individual sunn pest densities (sunn n/m²)

تراکم سن در مترمربع sunn pest densities (sunn n/m ²)	سناریوهای تغییر اقلیم Climate Change Scenarios									
	A	B	C	D	E	F	G	H	K	
2	2.2	2.3	2.5	2.2	2.2	2.4	2.1	2.2	2.4	
4	4.3	4.6	5.0	4.2	4.4	4.8	4.2	4.3	4.6	
8	8.5	8.9	9.6	8.3	8.6	9.2	8.1	8.5	9.0	
16	16.1	16.8	18.1	15.7	16.3	17.4	15.5	16.1	17.1	
Average میانگین	7.8	8.2	8.8	7.6	7.9	8.5	7.5	7.8	8.3	
A درصد تغییرات نسبت به سناریوی Changes to A scenario (%)		5.1	13.3	-2.3	1.6	8.9	-3.6	0.1	6.6	

برهمکنش افزایش غلظت دی اکسید کربن و درجه حرارت بود، اما با این وجود افزایش غلظت دی اکسید کربن هیچ گونه تأثیر مستقیمی بر طول دوره نمودی نداشت.

در شرایط تغییر اقلیم، افزایش غلظت دی اکسید کربن از طریق افزایش میزان فتوسنتز خالص و کارایی مصرف نور منجر به بهبود فتوسنتز خالص و در پی آن عملکرد شد. تأثیر افزایش درجه حرارت و برهمکنش افزایش درجه حرارت و غلظت دی اکسید کربن بر عملکرد نیز منفی بود. افزایش درجه حرارت از طریق کاهش طول دوره نمودی، منجر به کاهش طول دوره فتوسنتز و عملکرد شد. بنابراین به نظر می‌رسد که نقش حاصلخیزی افزایش غلظت دی اکسید کربن نه تنها از طریق اثرات منفی افزایش درجه حرارت خنثی شد، بلکه در این شرایط حتی با وجود افزایش کارایی مصرف نور، کاهش طول دوره نمودی و به دنبال آن کاهش طول دوره فتوسنتز و تجمع ماده خشک، کاهش عملکرد گندم را در پی داشت.

نتایج پیش‌بینی‌ها همچنین نشان داد که افزایش درجه حرارت منجر به شروع زودتر زمان ریزش آفت سن به مزارع و افزایش طول دوره همپوشانی آن با طول دوره رشد گندم شد. به نظر می‌رسد که افزایش درجه حرارت در شرایط تغییر اقلیم نه تنها از طریق افزایش طول دوره همپوشانی، بلکه به‌علت مساعد شدن شرایط محیطی برای زمستان‌گذرانی حشره منجر به افزایش خسارت آن شود. به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی، نقش افزایش درجه حرارت در مقایسه با افزایش غلظت دی اکسید کربن بر ویژگی‌های رفتاری و زمان ریزش سن بیشتر بود. از آن‌جا که در شرایط تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت دی اکسید کربن درجه حرارت نیز افزایش خواهد یافت، بنابراین به‌نظر می‌رسد در آینده خسارت آفت سن بر رشد و عملکرد گندم افزایش یابد.

در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم با افزایش تراکم سن، عملکرد دانه کاهش یافت. کاهش عملکرد دانه به‌علت خسارت سن گندم در تراکم ۱۶ حشره در مترمربع نسبت به شاهد در سناریوی C (۱۸/۱۱ درصد) در مقایسه با سناریوهای A (۱۶/۰۵ درصد)، B (۱۶/۸۳ درصد)، D (۱۵/۶۹ درصد)، E (۱۶/۳۰ درصد)، F (۱۷/۴۵ درصد)، G (۱۵/۴۹ درصد)، H (۱۶/۰۵ درصد) و K (۱۷/۰۸ درصد) بیشتر بود (جدول ۷). همچنین نتایج نشان داد که میانگین میزان خسارت سن گندم به عملکرد دانه تحت شرایط سناریوهای تغییر اقلیم از ۳/۶- تا ۱۳/۳ درصد در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی تغییر کرد (جدول ۷).

به‌نظر می‌رسد در شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با شرایط اقلیم فعلی، افزایش طول دوره همپوشانی سن با طول دوره رشد گندم و بهبود شرایط محیطی به‌علت افزایش درجه حرارت، منجر به جذب بیشتر ترکیبات فتوسنتزی گیاه توسط این آفت شده و از این طریق خسارت افزایش یافته است. برگانت^۱ و همکاران (۲۰۰۶) نیز گزارش کردند که افزایش درجه حرارت تا سال ۲۱۰۰ میلادی از طریق تأثیر بر درجه حرارت تجمعی و افزایش تعداد نسل‌های حشره تریپس پیاز، ممکن است باعث افزایش میزان خسارت این حشره شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم، افزایش ۲ و ۴ درجه سانتی‌گراد به متوسط درجه حرارت در طول دوره رشد گندم، از طریق تسریع مراحل فنولوژیکی گیاه، به ترتیب حدود ۱۳ و ۲۳ روز طول دوره رشد را کاهش داد. همچنین اثر افزایش درجه حرارت بر طول مرحله رویشی نسبت به مرحله زایشی گیاه بیشتر بود. این اثرات مشابه اثرات

منابع

- ایرانی پور ش.، خرازی پاکدل، ع.، رجیبی، غ. و رسولیان، غ. ۱۳۸۱. تلفات ویژه سنی و تغییرات سرعت نشو و نمای مراحل نابالغ سن گندم (*Eurygaster integriceps*) در چهار دمای ثابت آزمایشگاهی. مجله آفات و بیماری‌های گیاهی، ۷۰ (۲)، ۱-۱۷.
- جعفرنژاد، ا. و رحیمیان‌مشهدی، ح. ۱۳۸۱. مطالعه رقابت بین ارقام گندم با یولاف وحشی و منداب. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۰ (۱)، ۵۵-۹۳.
- خانجانی، م. ۱۳۸۳. آفات گیاهان زراعی ایران. چاپ اول انتشارات دانشگاه بو علی سینا همدان، صفحه ۷۱۹.
- طهماسبی، ا.، راشد محصل، م. ح.، رضوانی مقدم، پ.، قنبری، ع. و زند، ا. ۱۳۹۰. ارزیابی جوانه‌زنی و سبزشدن توده‌های یولاف وحشی (*Avena ludoviciana*) حساس و مقاوم به علفکش‌های آریلوکسی فنوکسی پروپیونات جمع‌آوری شده از مزارع گندم شهرستان‌های دزفول و اندیمشک. مجله پژوهش‌های زراعی ایران، ۹ (۳)، ۴۰۶-۴۱۵.
- کوچکی، ع.، سلطانی، ا.، شریفی، ح. و کمالی، غ. ع. ۱۳۸۰. اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات رشد، نمو و عملکرد آفتابگردان و نخود آبی و دیم در شرایط تبریز. علوم و صنایع کشاورزی، ۱۵ (۱)، ۱۵۵-۱۶۴.
- کوچکی، ع. و نصیری محلاتی، م. ۱۳۸۷. تأثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت CO₂ بر عملکرد گندم در ایران و ارزیابی راهکارهای سازگاری. پژوهش‌های زراعی ایران، ۶ (۱)، ۱۳۹-۱۵۳.
- مظفری، غ. و عزیزیان، م. ص. ۱۳۹۰. بررسی طغیان آفت سن گندم بر مبنای ویژگی‌های دما در استان کردستان (مطالعه موری: شهرستان بیجار). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۳ (۷۶)، ۱۲۱-۱۳۵.
- موحدی‌فاضل، م. و عبداللهی، غ. ع. ۱۳۸۱. بررسی روند تغییرات فصلی وزن تر، خشک و مقدار آب در سن معمولی گندم (*Eurygaster integriceps*) در اماکن تابستان و زمستان‌گذرانی. آفات و بیماری‌های گیاهی، ۷۱ (۱)، ۶۹-۷۷.
- نصیری محلاتی، م. و کوچکی، ع. ۱۳۸۸. پهنه‌بندی آگرواکولوژیکی گندم در استان خراسان: برآورد پتانسیل و خلاء عملکرد. مجله پژوهش‌های زراعی ایران، ۷ (۲)، ۶۹۵-۷۰۹.
- نوری، ح.، آزمایش‌فرد، پ.، عبداللهی، غ.، نوری‌قنبلانی، ق. و خرازی‌پاکدل، ع. ۱۳۸۱. ارزیابی خسارت کمی حشرات کامل سن معمولی گندم در منطقه قزوین. مجله آفات و بیماری‌های گیاهی، ۶۹ (۲)، ۱۵۵-۱۶۹.
- Asseng S., Jamieson P. D., Kimball B., Pinter P., Sayre K., Bowden J. W. and Howden, S. M. 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research*, 85: 85-102.
- Beaumont L. J., Hughes, L. and Poulsen, M. 2005. Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impacts on prediction of species current and future distributions. *Ecological Modeling*, 186: 250-269.
- Bergant K., Bogataj L. K. and Trdan, S. 2006. Uncertainties in modelling of climate change impact in future: An example of onion thrips (*Thrips Tabaci* Lindeman) in Slovenia. *Ecological modeling*, 194: 244-255.
- Critchley, B. R. 1998. Literature review of sunn pest *Eurygaster integriceps* Put. (Hemiptera, Scutelleridae). *Crop Protection*, 17: 271-287.
- Da Matta, F. M., Grandis, A., Arenque, B. C. and Buckeridge, M. S. 2010. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, 43: 1814-1823.
- De Wit, C. T. 1997. LINTUL1: A simple general crop growth model for optimal growing conditions (example: spring wheat). Dept. of Theoretical Ecology of the Wageningen Agricultural University and DLO-Research Centre for Agrobiology and Soil Fertility. P.O. Box 430, 6700 Wageningen, The Netherlands. 27 p.
- F. A. O. 2009. Sunn Pests and their Control in the Near East, F. A. O Corporate Document Respository, pp. 1-17.
- Fuhrer, J. 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone and global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97: 1-20.
- Hogy, P., Keck, M., Niehaus, K., Franzaring, J. and Fangmeier, A. 2010. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on biomass, yield and low molecular weight metabolites in wheat grain. *Journal of Cereal Science*, 52: 215-220.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: The physical science basis. Summary for policy makers. Paris: WMO/UNEP.
- Jamieson, P. D., Berntsen, J., Ewert, F., Kimball, B. A., Olesen, J. E., Pinter Jr, P. J., Porter, J. R. and Semenov M. A. 2000. Modelling CO₂ effects on wheat with varying nitrogen supplies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82: 27-37.
- Kazzazi, M., Bandani, A. R. and Hosseinkhani, S. 2005. Biochemical characterization of α -amylase of the Sunn pest, *Eurygaster integriceps*. *Entomological Science*, 8: 371-377.
- Kimball, B. A., Kobayashi, K. and Bindi, M. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in Agronomy*, 77: 293-368.

- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J. and White K. S. 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, New York. 1010 p.
- McDonald, A., Riha, S., DiTommaso, A. and DeGaetano, A. 2009. Climate change and the geography of weed damage: Analysis of U.S. maize system suggests the potential for significant range transformations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 130: 131-140.
- Mehrabadi, M., Bandani, A. R., Saadati, F. and Ravan, S. 2009. Sunn pest, *Eurygaster integriceps* Putton (*Hemiptera: Scutelleridae*), digestive α -amylase, α -glucosidase and β -glucosidase. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 12: 79-83.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. and Fischer, G. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emission scenarios. *Global Environmental Change*, 14: 53-67.
- Patterson D.T. 1995. Weeds in a changing climate. *Weed Science*, 43: 685-701.
- Richter, G. M. and Semenov, M. A. 2005. Modeling impacts of climate change on Wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. *Agricultural Systems*, 84: 77-97.
- Spitters, C. J. T., Van Keulen, H. and Kraalingen, D. W. G. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: *Simulation and Systems Management in Crop Protection*. Rabbinge, R., Ward, S. A. and Van Laar H. H. (Eds.), Pudoc, Wageningen, The Netherlands,. 147-181.
- Trnka, M., Muska, F., Semerádová, D., Dubrovský, M., Kocmánková, E. and Zalud, Z. 2007. European Corn Borer life stage model: Regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate. *Ecological modeling*, 207: 61-84.
- Tubiello, F. N., Amthor, J. S., Boote, K. J., Donatelli, M., Easterling, W. and Fischer, G. 2007. Crop response to elevated CO₂ and world food supply. *European Journal of Agronomy*, 26: 215-233.
- Van Kraalingen, D. W. G. 1995. The FSE system for crop simulation: version 2.1. *Quantitative Approaches in Systems Analysis Report 1*: C. T. de Wit Graduate School for Production Ecology and AB-DLO. Wageningen, The Netherlands. 58 p.
- Willoquet, L., Savary, S., Fernandez, L., Elazegui, F. and Teng P. 2000. Development and evaluation of a multiple-pest, production situation specific model to simulate yield losses of rice in tropical Asia. *Ecological Modelling*, 131: 133-159.

Modeling of Sunn Pest Damage (*Eurygaster integriceps* Put.) on Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Growth and Yield Under Climate Change Condition

Mondani^{*1}, F., Nassiri-Mahallati², M. and Koocheki². A.

Abstract

The future climate change will alter crop-pest interactions and will affect on amount of crops production, therefore, it is essential to predict pest damage in future conditions. Crop growth models are a technique that researchers could use to study possible impacts of climate change on crops. Although several dynamic models have been developed in recent years, most of them are not generally evaluating impacts of climate change on crop-pest interactions. In the present study, an eco-physiological crop model has been developed to meet these objectives. Its general structure relating to basic crop growth and yield is largely based on LINTUL model, and is written in Fortran Simulation Translator (FST) environment. In this modeling, first, we added phenological development stage (DVS) to LINTUL for simulation of winter wheat growth and then the model calibrated for potential production level. Finally, we incorporate effects of sunn pest damages to winter wheat growth and yield. Parameter values were derived from the literature. The model validated against observed values of DVS, total dry weight yield (TDWY) and grain yield (GY) of winter wheat and winter wheat yield loss due to sunn pest taken from a field experiment. Results indicated that the model was able to explain successfully the observed differences in DVS, TDWY and GY. The loss in TDWY and GY due to sunn pest was also explained satisfactorily. Our simulation results showed that life cycle of winter wheat (from 240 to 217) will be shortened due to accelerate development rate under future climate. The impact of rising temperature on average GY of winter wheat in sunn pest densities was negative (about 47%) while the impact of elevated [CO₂] was positive (about 36%) on it. Interaction of elevated [CO₂] and temperature also had a negative effect (about 18%) on average GY of winter wheat in sunn pest densities. The impact of rising temperature was positive on sunn pest while the impact of elevated [CO₂] had not any effects on it. Therefore, it seems that sunn pest damage on winter wheat growth and yield will be increased (about 7%) in the future climate compared to current climate.

Keywords: Climate change, Pest impact modeling, Validation, Yield loss

1. Assistant professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Campus of Agriculture and Natural Research, Razi University, Kermanshah

2. Professors, Department of Agronomy Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

*: Corresponding author Email: f.mondani@razi.ac.ir